

LA PROBLÉMATIQUE DE L'UTILISATION DES HERBICIDES EN FORESTERIE: le cas du Québec

Fortier, J., C. Messier et L. Coll, Département des sciences biologiques, institut des sciences de l'environnement et groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

Résumé : La problématique de l'utilisation des herbicides en foresterie est analysée selon une perspective historique et environnementale. Le développement des herbicides chimiques remonte à la fin de la deuxième guerre mondiale. Les premiers herbicides organochlorés étaient très efficaces, mais ils sont aussi très toxiques pour l'humain et l'environnement. Les herbicides développés plus récemment, comme le glyphosate, sont tout aussi efficace et beaucoup moins toxiques, mais ils sont mal perçus par la population. Au Québec, l'utilisation de tous les herbicides en forêt publique fut prohibée suite à une évaluation environnementale rigoureuse. Il semble que la décision d'abolir son utilisation était plus politique que scientifique. En effet, une comparaison sommaire des impacts environnementaux possibles du glyphosate comparativement aux dégagements mécaniques manuels et mécanisés ne permet pas de dégager lequel des traitements est préférable au niveau strictement environnemental. Puisque certains herbicides permettent une meilleure croissance des plantations, il est possible d'imaginer que ce gain de croissance pourrait être utilisé pour augmenter les aires protégées et le niveau d'aménagement écosystémique sur une proportion plus grande du territoire. Néanmoins l'utilisation d'herbicides devrait être largement surveillée tant au niveau de l'application qu'au niveau du suivi environnemental.

Mots-clés : foresterie, gestion de la végétation accompagnatrice, Québec, historique, glyphosate, impacts environnementaux, alternatives, traitements mécaniques, traitements chimiques

Abstract : Herbicide use in forestry is analysed from an historical and environmental perspective. First chemical herbicides were developed during the Second World War. Organochloride herbicides were widely used in the past but they are now classified as very harmful for human and the environment. However, recently developed herbicides like glyphosate present the same efficiency and a much lower toxicity. In general, the public opinion about herbicides is strongly negative. In Québec, all herbicides were banned from use in public forest after some environmental assessments. This decision seems to be more politically than scientifically based. In the case of intensive managed forest, mechanical treatments with forest tractors can present similar or even lower environmental impacts than glyphosate, but few studies exist to make an objective comparison. Furthermore, in terms of tree growth, low toxicity herbicides seem to present higher effectiveness than mechanical treatments. This possible growth gain can then be used to reduce pressure on natural forest by increasing protected areas and the use of ecosystem forest management. Nevertheless, the use of herbicides must be strictly monitored to reduce environmental risks.

Keywords: forestry, forest vegetation management, Quebec, historic, glyphosate, environmental impacts, alternatives, mechanical treatments, chemical treatments

Introduction

C'est principalement à partir des années 1980 que les pays commencent à prendre conscience du rôle global que joue la forêt au niveau de la stabilité de la biosphère, du maintien de la biodiversité et de la protection des civilisations autochtones menacées (FAO, 1994). Toutefois, l'accroissement démographique actuel mène à une augmentation des besoins en ressources renouvelables comme le bois, ce qui se traduit par d'énormes pressions sur les écosystèmes forestiers (Kimmins, 2004). Dans un tel contexte, on observe de plus en plus une division entre forêt productive où on essaye d'extraire le maximum de bois et forêt de conservation où les autres valeurs sont protégées ou prioritaires. Il devient donc urgent de maximiser la production de bois dans ces zones productives et une certaine gestion de la végétation accompagnatrice, terme emprunté à

l'expression anglo-saxonne « forest vegetation management » est souvent nécessaire.

La végétation accompagnatrice comprend les espèces des strates herbacées et arbustives, les mousses, les fougères, les lianes et d'autres bryophytes. Elle constitue donc l'ensemble des espèces végétales présentes à côté des essences forestières exploitées. L'impact de cette végétation dans l'établissement et la croissance des plantations est critique puisque, dépendamment de la nature des espèces accompagnatrices, des effets inhibiteurs ou bénéfiques peuvent être observés (Frochot et al, 2002).

Présentement, il existe plusieurs techniques pour maîtriser la végétation accompagnatrice ayant un effet inhibiteur sur la croissance des arbres en milieux forestier. Les deux pratiques les plus couramment utilisées sont les traitements mécaniques (manuel ou motorisé) et les traitements chimiques par épandage

aérien ou terrestre (manuel ou motorisé) d'herbicides. A cela, s'ajoutent diverses alternatives comme l'utilisation du feu (Feller, 1996) l'introduction de plantes couvre-sol (Thomas et Steen, 1996 ; Provendier et Balandier, 2004 ; Schutz, 2004), l'utilisation des moutons (Newsome, 1996; Negrave, 1996) ou de d'autres animaux domestiques (Mount, 1992; Luginbuhl et Green 2005), l'application de produits naturels comme substances herbicides (Duke et al., 2000; Micheal et Hermy, 2002), l'utilisation de jute couvre-sol ou paillis (McDonald et Fiddler, 1996), l'application d'organismes pathogènes, comme le champignon *Chondrostereum purpureum* (Becker et al., 2005), etc.

Par ailleurs, le coût de ces diverses opérations varie considérablement tout comme leur efficacité. Ainsi, le choix du type de gestion de la végétation accompagnatrice dépend en partie du système de production envisagé et des investissements disponibles (Frochot et al. 2002, 2003). Dans un système de production forestière intensif, un contrôle de la végétation en fonction d'un seuil économique sera préconisé afin d'optimiser la production ligneuse. Dans le cas d'un système extensif, on mettra plutôt sur l'optimisation des effets auxiliaires de la végétation accompagnatrice (e.g. maintien de la biodiversité, conservation des habitats, brout pour la faune, etc.) plutôt que d'opter pour une élimination systématique.

Les considérations environnementales sont ainsi devenues une composante majeure de la gestion de la végétation accompagnatrice. D'ailleurs l'un des critères écologiques fondamentaux de la foresterie durable repose sur le maintien et la conservation de la biodiversité (Linhgren et Sullivan, 2001). Il est donc nécessaire de choisir des traitements qui n'occasionnent pas d'impact négatif sur l'environnement en termes de pollution de l'eau, du sol, de l'air, de toxicité sur les animaux, de pertes d'espèces ou de modifications à long terme de la structure et de la composition en espèces végétales et animales.

Mis à part les considérations économiques et environnementales, le choix du type de gestion de la végétation accompagnatrice dépend largement des perceptions et des valeurs du grand public et des groupes de pression (Wagner et al., 1998; Messier et Kneeshaw, 1999). Ainsi, l'intégration de cette composante sociale qui souvent ne perçoit pas le risque de la même manière que la communauté scientifique, prend depuis quelques années une importance grandissante dans le processus de prise de décision.

Dans cet article, nous procéderons à une analyse approfondie de la problématique de l'utilisation des herbicides dans le cadre d'une gestion de la végétation accompagnatrice dans les aires de reboisement destinées à un aménagement intensif. L'article est divisé en trois parties : dans la première partie, un bref historique de l'utilisation de ces herbicides chimiques en foresterie est réalisé avec une attention particulière pour le cas du Québec. Par la suite, les impacts environnementaux des herbicides (en mettant l'accent sur le glyphosate) sont effectués et comparés à ceux des

méthodes alternatives. La dernière partie de l'article est consacrée aux impacts associés aux diverses alternatives de gestion de la végétation.

Historique du développement et de l'utilisation des herbicides en milieu forestier

L'utilisation de substances chimiques pour réaliser le contrôle de la végétation remonte à plus d'un siècle. C'est en Allemagne, vers les années 1850, que la première substance herbicide voit le jour, un mélange de sel et de jus de lime était alors utilisé. Il a fallu ensuite plusieurs décennies avant de voir apparaître de nouveaux produits chimiques pour contrôler la végétation (cette revue historique a été adaptée de l'article de McCormack, 2000).

Les années 1940-60 : La deuxième Guerre Mondiale a permis l'avancement de nombreuses technologies et c'est dans ce contexte d'innovation que les propriétés phytotoxiques de l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D) ont été élucidées. Deux laboratoires indépendants (Angleterre et États-Unis) synthétisent la même substance chimique presque au même moment. Suite à cette découverte, le premier épandage aérien d'herbicide (2,4-D) à des fins sylvicoles a lieu en 1947 dans le Nord-Est des États-Unis.

Durant la période d'après-guerre, la demande en bois augmente considérablement et le besoin de produire plus de matière ligneuse est fortement ressenti. Suite à de nombreux efforts de recherche, le potentiel de l'acide 2,4,5-trichlorophénoxyacétique (2,4,5-T) pour dégager les plantations de conifères est confirmé. Les premiers essais ont lieu sur le pin dans la forêt expérimental de Massabesic (Maine, États-Unis). L'application de cette substance se faisait alors par avion ou hélicoptère.

Au cours des années 1960, l'industrie agricole connaît une progression technologique fulgurante et elle développe alors d'autres technologies et d'autres substances phytotoxiques pour intensifier sa production. À cette époque donc, les technologies utilisées pour gérer la végétation accompagnatrice proviennent essentiellement d'adaptations d'outils disponibles en agriculture. En foresterie, l'épandage manuel au sol d'herbicides est néanmoins développé. Les travailleurs munis de sac à dos peuvent maintenant arroser les aires de traitements de manière plus contrôlée. C'est aussi durant cette période qu'un petit livre écrit par Mme Rachel Carson, *Silent spring* (1962) est publié. Comme son titre l'indique, ce livre faisait état d'un printemps hypothétique sans le gazouillement des oiseaux dû à leur élimination systématique par l'épandage des herbicides synthétiques. Ce livre eut un impact majeur sur la perception du public vis-à-vis de l'usage grandissant des herbicides synthétiques et de leurs risques pour la santé des écosystèmes naturels et des humains.

Les années 1970-80 : Encore une fois, c'est un conflit géopolitique qui est responsable de l'évolution de l'utilisation des

herbicides. Durant la Guerre du Vietnam, de nombreuses combinaisons d'herbicides sont testées à des fins militaires. C'est le célèbre *Agent Orange* (un mélange de 2,4-D et de 2,4,5-T) qui est retenu pour la stratégie militaire de défoliation de la jungle vietnamienne. L'extraordinaire efficacité de ces herbicides et leurs impacts sur la santé humaine ont eu un effet important sur la perception du public face à ces nouvelles substances chimiques alors utilisées couramment en agriculture, horticulture et foresterie. Cependant, contrairement aux herbicides utilisés pour la production agricole ou sylvicole, les herbicides développés à des fins militaires ne passaient devant aucune commission afin d'être homologué. Par conséquent, ces herbicides pouvaient contenir des quantités de contaminants, comme les dioxines, beaucoup plus élevées que ceux prévus par les critères d'homologation.

Pendant cette même période, la conscience sociale face aux risques des substances chimiques se développe suite à des incidents industriels comme la fuite de TCDD (une dioxine fortement toxique) à Seveso en Italie en juillet 1976. Le TCDD est alors identifié comme un contaminant présent à l'état de trace dans certains herbicides de type phenoxy (comme le 2,4,5-T) lorsqu'ils sont produits à certaines températures.

C'est l'anticipation de l'éventuelle interdiction d'utiliser le 2,4,5-T qui stimule les efforts de recherche sur le glyphosate et certaines autres substances phytotoxiques. En 1974-1975, de nombreuses expériences forestières concernant les herbicides ont lieu dans l'état du Maine. Le glyphosate, l'hexazinone et le triclopyr sont alors testés pour la première fois et comparés aux herbicides classiques tels que le 2,4-D, le 2,4-DP, le picloram et le MSMA.

En 1977 les premiers essais d'épandage aérien de glyphosate et de triclopyr en milieu forestier ont lieu en Amérique du Nord. Avant ces essais, le dégagement était réalisé seulement à l'aide d'herbicide de type phenoxy. Enfin, en 1979, les états de l'Oregon, du Maine et du Vermont (États-Unis) enregistrent le glyphosate pour l'épandage aérien en milieu forestier.

La période 1979-1983 est marquée par des recherches intenses sur les risques du 2,4,5-T et le 2,4,5-TP sur l'environnement et la santé humaine. Ces recherches mèneront à leur bannissement aux États-Unis. En 1980, toujours aux États-Unis, le gouvernement fédéral permet l'utilisation du glyphosate en foresterie. Quatre ans plus tard, en 1984, le Canada emboîte le pas et permet aussi son utilisation en forêt.

Dès ce moment, l'usage du glyphosate devient très répandu pour dégager les plantations et optimiser la croissance des plants. De nombreuses études toxicologiques, écotoxicologiques et écosystémiques sont alors réalisées afin de tester l'effet du glyphosate sur l'environnement et la santé humaine.

Les années 1990-2000 : La gestion de la végétation accompagnatrice prend de plus en plus d'importance à l'échelle internationale. On assiste ainsi en 1992 à la première *International Conference on Forest Vegetation Management* (IFVMC) qui deviendra, à chaque trois ans, l'occasion pour les chercheurs d'échanger leurs découvertes dans ce domaine.

Au niveau législatif, l'état du Vermont (États-Unis) bannit en 1997 les herbicides en foresterie en imposant un moratoire de 10 ans sur leur utilisation. En 1998, un groupe de pression tente de faire bannir les herbicides en foresterie au New Hampshire (État-Unis), mais l'état refuse cette mesure, la jugeant excessive et restrictive. Quelques années plus tard en 2001, au Maine (États-Unis), un référendum approuve un moratoire de 10 ans sur l'utilisation des pesticides en milieu forestier. Au Canada, seul le Québec suit un processus similaire et déclare un moratoire sur l'utilisation des herbicides en milieu forestier.

Situation actuelle : Des pays comme la France, la Grande-Bretagne, la Nouvelle-Zélande, Israël, la République Tchèque et la Finlande utilisent, encore, une gamme relativement restreinte d'herbicides pour optimiser leur production ligneuse alors que d'autres pays comme la Suisse et la Suède ont complètement banni leur usage. Aux États-Unis, l'usage d'herbicides est permis et comme nous l'avons vu, il en revient aux états de légiférer sur les conditions spécifiques de leur usage. Présentement, tous les états limitrophes au Canada, mis à part le Maine et le Vermont, peuvent utiliser des herbicides en milieu forestier.

Au Canada, certains herbicides sont approuvés pour le contrôle de la végétation accompagnatrice en forêt, mais la législation en matière d'herbicides dépend aussi des volontés politiques de chacune des provinces. Le Québec est actuellement la seule province canadienne à n'autoriser aucun herbicide en milieu forestier.

En sol canadien, seulement quatre substances actives (pour un total de 11 formulations herbicides) sont enregistrées pour un usage forestier, mais trois sont réellement utilisés : 2,4-D, glyphosate et napropamide (ARLA, 2006). Le glyphosate (Vision^{MD}) demeure néanmoins le plus populaire et il est utilisé dans plus de 90% des cas au cours des années 90 (Thompson et Pitt, 2003). Au cours de cette même période, l'Ontario a été la province canadienne qui a utilisé le plus d'herbicide en forêt avec 43% des quantités totales utilisées au Canada, alors que la Colombie-Britannique et le Nouveau-Brunswick en ont fait un usage moins important (Thompson et Pitt, 2003).

Historique de l'utilisation des herbicides au Québec

Au Québec, la problématique de l'utilisation des herbicides en milieu forestier a évolué de concert avec les préoccupations et les revendications de la population et des groupes de pression. Pour cette raison, les programmes gouvernementaux d'épandage d'herbicides et les stratégies d'exploitation forestière se sont

retrouvés, comme nous allons le voir plus bas, plus d'une fois au Bureau d'Audience Publique en Environnement (le BAPE). Cet organisme gouvernemental québécois a la mission d'informer et de consulter la population sur des questions relatives à la qualité de l'environnement que lui soumet le ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs afin d'éclairer la prise de décisions de l'État dans une perspective de développement durable. Le BAPE est donc une sorte de médiateur entre le gouvernement, l'industrie et la population qui déploie les moyens nécessaires pour favoriser la participation active des citoyens.

L'utilisation d'herbicides en foresterie a commencé au tournant des années 70 au Québec, mais ce n'est pas avant le début des années 80 que le Ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) élabore son premier projet de pulvérisation aérienne d'herbicides. Le projet était destiné à couvrir, par épandage aérien, 10 506 ha en 1983 et 11 452 ha en 1984 dans les régions administratives du Bas Saint-Laurent – Gaspésie, de la Mauricie, de l'Abitibi – Témiscamisque et de la Côte-Nord. On prévoyait alors utiliser pour l'année 1983, le 2,4-D sur environ 10% du territoire et le 2,4,5-T sur le reste tandis que durant l'année 1984 le 2,4,5-T serait l'unique herbicide utilisé. Ce projet a rapidement soulevé un important débat public à cause de l'évidence grandissante de la grande toxicité des impuretés contenues dans le 2,4,5-T. Face à cette controverse, le ministère de l'Environnement confie au BAPE, en mars 1983, le mandat d'enquêter et de tenir des audiences publiques relativement au projet de pulvérisation aérienne d'herbicides en milieu forestier. Les conclusions et recommandation du BAPE sur le projet de pulvérisation aérienne d'herbicides en milieu forestier de 1983-84 ont été les suivantes :

- Le 2,4,5-T est potentiellement toxique à cause du contaminant TCDD (une dioxine) et son utilisation comporte un trop grand risque pour l'humain et l'écosystème. La toxicité du 2,4-D étant moins probante que celle du 2,4,5-T, son utilisation devrait cependant être substituée par les moyens mécanisés de dégagement.
- Les moyens mécaniques ne peuvent présentement substituer les moyens chimiques adéquatement car ils n'ont pas encore été soumis à une évaluation rigoureuse. Leur efficacité et praticabilité en milieu forestier québécois est donc incertaine. (BAPE, 1983-1984)

Suite à ces recommandations du BAPE, le Gouvernement décida donc d'interdire toute utilisation de 2,4,5-T et de 2,4-D en forêt. Il n'a cependant pas fallu attendre bien longtemps pour voir d'autres herbicides faire leur apparition en foresterie. En 1984, le glyphosate, sous la formulation commerciale Vision^{MD}, est homologué au Canada et il devient en 1985 l'herbicide par excellence pour dégager les plantations de résineux au Québec (Legris, 1989).

À cette époque, on assiste à un effort considérable de reboisement catalysé par l'adoption en 1986 de la *Loi sur les*

forêts et en 1989 de la *Politique d'utilisation des pesticides en milieu forestier* (MRNF, 2005). Pour la période de 1988 à 1993, des superficies moyennes de 31 000 ha sont ainsi traitées par le glyphosate chaque année (BAPE, 1997) et ce n'est qu'à partir de 1994 que les superficies dégagées avec des herbicides commencent à diminuer (figure 1).

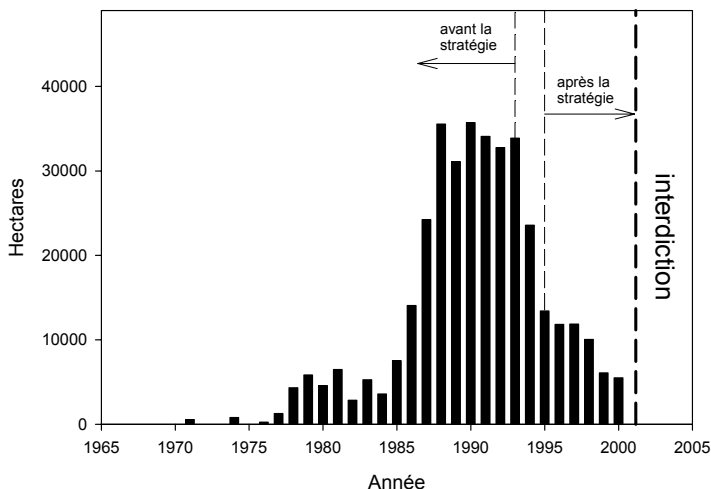


Figure 1. Utilisation de d'herbicides dans le milieu forestier québécois depuis 1971 (d'après le MRNF, 2005)

Cette baisse substantielle dans l'utilisation d'herbicides chimiques de dégagement coïncide avec l'adoption de la *Stratégie de protection des forêts* du ministère des Forêts (MFO) en 1994. Un des engagements au cœur de la stratégie du MFO était d'éliminer complètement l'utilisation des herbicides chimiques en forêt publique au cours des prochains dix ans. Cet engagement ministériel n'a cependant pas fait l'unanimité chez les compagnies forestières, les ingénieurs forestiers responsables de la gestion des forêts et Hydro-Québec qui se devait de dégager la végétation sous les lignes à haute tension. Cette période de 10 ans était perçue comme irréaliste. Après avoir étudié ce projet de loi, le BAPE proposait déjà en 1991 une mesure encore plus drastique, soit « que le recours aux herbicides chimiques soit banni d'ici cinq ans après l'adoption de la Stratégie ». Selon le BAPE, ce délai de cinq ans était suffisant pour améliorer l'efficacité des méthodes mécaniques (alternatives aux herbicides) sur le plan de l'environnement et de la santé.

En 1997, on assiste à une autre audience publique du BAPE sur le *Programme de dégagement de la régénération forestière*. Ce projet du MRN était alors destiné à couvrir la période de 5 ans précédant l'arrêt complet de l'utilisation des herbicides en milieu forestier fixé pour 2001. Suite à l'audience, le BAPE recommande plutôt au MRN de ne retenir que le scénario de

dégagement mécanique et biomécanique et d'éliminer complètement l'utilisation des herbicides. Les raisons évoquées par le BAPE ont été les suivantes :

- À la lumière des informations disponibles, les impacts environnementaux découlant de l'utilisation du glyphosate sont supérieurs à court terme à ceux du mode de dégagement mécanique particulièrement en ce qui a trait à la dynamique des populations fauniques
- La crainte de la population pour tout ce qui est chimique est trop grande
- Le Gouvernement doit maintenir son engagement de bannir les herbicides au plus tard en 2001
- Cette décision va dans le sens du principe de prudence développé par la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
- Le dégagement mécanique est perçu comme un outil de développement économique et social régional puisqu'il crée beaucoup plus d'emplois

Bien que la participation à l'audience publique à été jugée faible par certains participants, les revendications sociales et environnementales de la population ont eu les dessus sur les revendications économiques des industriels et du gouvernement (BAPE, 1997).

Le Gouvernement décide donc finalement en 2001 d'abolir l'utilisation des herbicides en milieu forestier. Cette mesure ne s'applique qu'en forêt publique, mais depuis, le Gouvernement ne subventionne plus les travaux sylvicoles faits en forêt privée s'il y a utilisation d'herbicides. Depuis, la gestion de la végétation accompagnatrice s'effectue principalement de façon mécanique suivant les recommandations du BAPE après l'audience publique de 1997 (Dubois, 2002). L'usage des herbicides demeure néanmoins permis pour certaines activités forestières autres que le dégagement des plantations, pour les bleuélières du lac St-Jean, par exemple. L'utilisation d'herbicides est permise, cependant, pour supprimer ou contrôler la végétation sur les routes forestières et sous les lignes à haute tension (Loi sur les pesticides, Québec, 2005).

Actuellement, outre les traitements mécanisés qui sont principalement utilisés, une stratégie de reboisement hâtif est mise en oeuvre dans les stations où la compétition végétale s'avère forte (Thiffault et al., 2003). Au niveau de la recherche, un modèle de maîtrise intégrée de la végétation forestière adapté aux caractéristiques écologiques des stations reboisées est en plein développement (Roy et al., 2003). Ce modèle comprend l'utilisation des opérations de préparation de terrain, de reboisement hâtif, de mise en terre de plants de fortes dimensions et de dégagement mécanique (essentiellement manuel) de plantations. Un réseau de 14 stations expérimentales, couvrant trois régions écologiques distinctes, a ainsi été créé afin d'étudier l'effet combiné de ces diverses stratégies (Roy et al., 2003). Cette stratégie de maîtrise intégrée de la végétation semble être

efficace dans les plantations résineuses (Thiffault et al. 2004), ce qui est de bon augure puisque c'est cette forme de régénération artificielle qui est majoritaire au Québec.

Les impacts environnementaux des herbicides : le cas du glyphosate

Aujourd'hui, les herbicides sont reconnus comme des substances chimiques relativement dangereuses pour la santé humaine et celle des écosystèmes. Parmi les herbicides les plus utilisées, on en retrouve qui sont potentiellement cancérigènes et/ou perturbateurs du système endocrinien (NCAP, 1999a) Une fois lessivés par l'eau de pluie ou dispersés par le vent, certains de ces composés chimiques se retrouvent dans les cours d'eau et les aquifères (NCAP, 1999b). De plus, quelques un de ces herbicides appartiennent à la classe des produits chimiques persistants en raison de leur potentiel de bioaccumulation. Cependant, ce ne sont pas tous les herbicides qui ont la même toxicité pour l'environnement. Le glyphosate, un ingrédient actif développé par Monsanto sous plusieurs formulations, est largement utilisé en foresterie pour éliminer la végétation compétitrice. Au Canada, en 1998 environ 38% des traitements sylvicoles réalisés dans les plantations utilisaient le glyphosate (Mihajlovich et al., 2004).

Mode d'action et toxicité

Le glyphosate (N-phosphonomethylglycine), un inhibiteur compétitif, bloque une enzyme spécifique à la plante, la 3-énolpyruvylshikimate-5-phosphate synthase (Voet et Voet 1998). Il perturbe ainsi certaines voies métaboliques propres aux végétaux, dont la synthèse des acides aminés aromatiques (Harzler, 2001). Le glyphosate est donc un phytocide non-sélectif, systémique et post-émergeant (Franz et al., 1997). Généralement, on le retrouve sous la forme d'un sel couplé à l'isopropylamine, un surfactant facilitant son transport à travers la cuticule végétale (Relyea, 2005). Ce surfactant a aussi la particularité de restreindre la mobilité de la molécule dans l'écosystème. Plusieurs études de toxicologie démontrent que le glyphosate, à cause de son mode d'action particulier, est hautement toxique pour les plantes et largement non-toxique pour les animaux (William et al., 2000, Tatum, 2004). De plus, il n'existe aucune évidence que le glyphosate possède des propriétés de neurotoxicité, d'immunotoxicité et de perturbateur endocrinien (SERA 2002). En fait le glyphosate est l'une des substances chimiques les mieux caractérisées aujourd'hui et il existe même des informations toxicologiques pour les métabolites issus de cette substance (William et al., 2000)

Cependant, il existe une forte controverse à savoir si les formulations commerciales du glyphosate, comme le Roundup^{MD}, sont potentiellement plus toxiques que l'ingrédient actif seul. À cet effet, des études en laboratoire montrent par exemple que le Roundup^{MD} est plus toxique au niveau des érythrocytes (Pieniazek, et al., 2004) et au niveau de la

respiration mitochondriale (Peixoto, 2005) que le glyphosate seul. Néanmoins, bien que ces études aient démontré la toxicité accrue du Roundup^{MD}, elles ne sont pas représentatives de réels scénarios d'exposition. William et al. (2000) ont d'ailleurs démontré que le Roundup^{MD} n'a aucun effet négatif sur le développement, sur le système reproducteur et sur le système endocrinien. Selon ces auteurs, le Roundup^{MD} ne présente donc aucun risque pour la santé humaine et celle des mammifères lorsqu'il est utilisé adéquatement. Par souci préventif, il serait quand même prudent de mettre en place des études *in situ* tant en milieux agricoles que sylvicoles afin de comparer, au niveau des impacts environnementaux, les formulations commerciales du glyphosate à la substance active seule. Enfin, il est important de faire la distinction entre les usages agricoles et sylvicoles d'herbicides. En sylviculture, la période critique d'utilisation d'herbicides se situe généralement pendant les deux premières années suivant l'établissement des semis (Balandier et al., 2005) mais elle peut s'étirer sur quelques années en présence d'une compétition végétale féroce. Sommes toute, dans la majeure partie des cas rencontrés en foresterie, l'application d'herbicides survient une à deux fois pour toute la durée de la rotation alors qu'en agriculture intensive cette application est réalisée au moins une fois l'an et à chaque année. Les impacts environnementaux découlant de chacun de ces usages sont donc bien différents. Bien que l'utilisation sylvicole d'herbicides mène à de plus faibles impacts qu'en agriculture, l'application de ces substances doit être adéquatement surveillée et faire l'objet d'un suivi environnemental afin de s'assurer que leur présence en milieux naturels ne gêne pas l'intégrité des écosystèmes.

Au niveau de sa dispersion dans l'environnement, le glyphosate présente des qualités intéressantes lorsque utilisé avec un surfactant approprié. Fortement retenu par le sol et donc peu lessivé, ce sont les microorganismes qui dégradent la majeure partie du glyphosate non absorbé par les plantes (Kools et al., 2005). Les pertes au niveau de la photodécomposition et/ou volatilisation semblent négligeables (Couture et al., 1995; Malik et Kishore, 1989). Par ailleurs, plusieurs chercheurs travaillent déjà depuis plus d'une vingtaine d'années afin d'optimiser les processus d'utilisation du glyphosate dans les aires de reboisement afin d'en réduire davantage les impacts sur les écosystèmes (Thompson et Pitt, 2003). Le tableau 1 résume brièvement les caractéristiques ainsi que les impacts environnementaux connus du glyphosate selon les composantes physiques, biologiques et sociales étudiées.

Impacts sur la composition de la communauté végétale et faunique

Au niveau des impacts sur la végétation et la faune en forêt, on observe habituellement un changement temporaire dans la composition et l'abondance des espèces végétales suite à un traitement au glyphosate (Micheal et Hermy, 2002). L'effet majeur se fait évidemment sentir les premières années du traitement où, selon la proportion de la superficie traitée, une

majeure partie de la végétation est supprimée. Par ailleurs, le changement de composition de végétation suite à l'application du glyphosate, bien qu'il soit éphémère, peut provoquer des impacts indirects sur la faune. Par exemple, chez les gros mammifères, l'application de glyphosate sur des terrains forestiers a comme conséquence une diminution à court terme de la disponibilité en nourriture. La diversité et la densité des populations de petits mammifères sont cependant peu affectées par ce type de traitement. Du côté des invertébrés et des oiseaux, les impacts indirects peuvent être positifs ou négatifs dépendamment de l'espèce étudiée. Le tableau 2 résume les nombreux travaux réalisés à ce sujet. Globalement, on remarque donc que les effets négatifs indirects sur la faune ont plutôt lieu dans les 3 années qui suivent le traitement, alors qu'à plus long terme ces impacts tendent à s'estomper. Enfin au niveau microscopique, les communautés bactériennes et fongiques semblent très peu affectées par l'épandage de glyphosate en milieu forestier (Houston et al, 1998; Stratton et Stewart, 1992). Il faut noter ici que la comparaison du traitement du glyphosate s'est généralement faite avec un site contrôle où la végétation n'était traitée d'aucune façon Ceci suggère que les différences seraient encore moindres si les comparaisons étaient faites avec des sites traités mécaniquement.

Les impacts environnementaux des herbicides sont normalement directement reliés à la proportion de la surface forestière qui est traitée. On peut donc réduire les impacts en limitant son utilisation à la partie directement adjacente à l'arbre planté. En effet, quelques études montrent qu'un traitement localisé à la base du plant par épandage terrestre est tout aussi efficace, après un an, qu'un épandage sur toute la superficie de reboisement (Coll et al., 2005; Richardson et al. 2005). En minimisant ainsi la surface traitée, on minimise les impacts sur la composition de la végétation et indirectement sur la faune. Par ailleurs, cette utilisation locale d'herbicides permet de créer deux dynamiques de végétation décalées dans le temps, ce qui diversifie les habitats et par conséquent les espèces fauniques.

C'est dans ce contexte que l'usage de certains herbicides est toléré par les organismes de certification qui prône une foresterie durable et responsable tels que le Forest Stewardship Council (FSC), un des plus importants organismes internationaux de certification forestière. Selon le FSC, la gestion forestière doit promouvoir le développement et l'adoption de techniques non chimiques et à faibles impacts environnementaux pour gérer la végétation accompagnatrice ou tout autre forme de peste. Il n'en demeure pas moins que l'utilisation d'herbicide est considérée acceptable par le FSC si les gains environnementaux d'un tel usage sont clairement démontrés (FSC, 2005).

Tableau 1. Évaluation des impacts de l'utilisation du glyphosate dans les aires de reboisement

Composante	Caractéristiques	Références
Physique	- non volatil / peu de photo-décomposition	Doliner, 1991
	- relativement immobile dans le sol	Doliner, 1991
	- rapidement transformé puis dégradé par les microorganismes du sol	Malik et al., 1989
	- demi-vie inférieure à 60 jours	Feng et Thompson, 1990
	- généralement non détecté après 12-15 mois suivant sont application	Couture et al., 1995
	- généralement peu lessivé	US EPA, 1990
Biologique	- dégradé plus lentement dans les sédiments	Couture et al., 1995
	- principalement absorbé par le feuillage des plantes	Couture et al., 1995
	- niveau de toxicité directe faible chez les animaux	Tatum, 2004
	- aucune évidence de neurotoxicité, d'immunotoxicité et non perturbateur du système endocrinien	SERA, 2002
	- pas de bioaccumulation	Malik et al., 1989
	- pratiquement non toxique pour une absorption cutanée	Couture et al., 1995
	- dans le contexte forestier québécois, présente peu risque pour la faune	Couture et al., 1995
	- risques d'intoxication associés aux additifs, aux impuretés et aux métabolites sont faibles	Couture et al., 1995
	- un changement dans la composition des espèces végétales est observé suivant un traitement	Couture et al., 1995
	- à moyen terme, la composition végétale revient à la normale	Michael et Hermy, 2002
	- des effets indirects sur la faune (habitat, nourriture) sont observés à court terme (jusqu'à 3 ans)	Lautenschlager et Sullivan, 2002
	- à moyen terme l'augmentation du brout et du couvert favorise les communautés aviennes et les gros mammifères	Voir tableau 2
		Voir tableau 2
Sociale	- Risque pour les travailleurs est faible	Lavy et al, 1992
	- Risque d'intoxication de la population, selon le scénario du pire cas réaliste, demeure faible	Couture et al., 1995
	- Inquiétude et opposition de la population	Wagner, 1994

Tableau 2a. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier (d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Thème de l'étude		Observations et conclusions	Références
Oiseaux		Le traitement entraîne un changement de végétation et d'habitats qui peut-être positif ou négatif dépendant de l'espèce.	
Effet à court terme		Densité totale réduite significativement par les traitements de dégagement des conifères.	Lautenschlager, 1991 (Maine, É.-U.)
		Densité réduite chez la plupart des espèces nicheuses, l'année du traitement. L'année suivante on retrouve une densité similaire à avant le traitement.	Mackinnon et Freedman, 1993 (Nouvelle-Écosse, Canada)
		Pas de différence dans la densité globale de la communauté aviaire entre le secteur traité et le contrôle.	Morisson et Meslow, 1984 (Oregon, É.-U.)
		Densité totale moindre dans les secteurs traités pour les trois ans suivant le traitement.	Santillo et al., 1989 (Maine, É.-U.)
		Profil de la communauté aviaire pas affecté un an suivant le traitement dans une sapinière à bouleau jaune. Pas de différences significatives dans l'incidence de prédation sur les œufs entre secteur traité et le contrôle.	Déry et al., 1994 (Québec, Canada)
Effets à moyen terme		L'abondance relative des espèces diffère 3-5 ans après le traitement à cause du changement dans la structure de végétation entre secteur traité et le contrôle.	Milton et Towers, 1990 (Nouvelle-Écosse, Canada)
		Augmentation significative de la densité de plusieurs espèces 7-9 ans après le traitement due aux modifications d'habitats.	Hardy et Desgranges, 1990 (Québec, Canada)
Petits mammifères		La diversité et la densité des populations semblent peu affectées par un traitement au glyphosate en milieu forestier.	
Effet à court terme		Diversité, abondance et biomasse des populations augmentent 1 an après l'année du traitement; 2 ans après le traitement, retour aux mêmes valeurs qu'avant le traitement.	Anthony et Morrison, 1985 dans Lautenschlager, 1993 (Oregon, É.-U.)
		2 mois après le traitement pas de changement dans les populations; seul le campagnol à dos roux a été moins abondant un an après le traitement.	D'Anieri et al., 1987 (Maine, É.-U.)
		Densité réduite pour le campagnol à dos roux, 1 an après traitement; inversement les petits mammifères fréquemment retrouvés sur ces sites (ex : souris sylvestre) sont avantagés.	Lautenschlager, 1991 (Maine, É.-U.)
		Souris sylvestre plus abondante dans les zones non traitées; la taille des souris est identique pour le contrôle et la zone traitée.	Ritchie et al., 1987 dans Lautenschlager, 1993
		Aucun effet négatif sur la reproduction, la croissance et la survie de la souris sylvestre, 1 an après le traitement.	Sullivan et Sullivan, 1981 dans Lautenschlager, 1993 (Colombie-Britannique, Canada)
		Peu de changements au sein des populations un an après traitement, faible augmentation ou diminution de certaines populations.	Déry et al, 1994 (Québec, Canada)

Tableau 2b. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier (d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995).

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Petits mammifères Effet à court terme	<p>Diversité et richesse semblable à un site non traité.</p> <p>Pendant les deux ans qui suivent le traitement, les populations de souris sylvestre présentent un ratio de sexe, un poids corporel moyen, un taux de reproduction et de survie similaire comparable au contrôle.</p> <p>Populations de souris sylvestre décroissent dans les deux mois qui suivent le traitement sur le site côtier mais demeurent non affectées sur l'autre site.</p> <p>Populations de souris (tamia) pas affectées par le traitement.</p> <p>Rien n'indique une diminution de diversité après un traitement.</p> <p>Taux de capture similaire pour 6 espèces entre la zone traitée et le contrôle pendant les deux ans suivant l'épandage.</p> <p>Aucun traitement n'a semblé affecter l'abondance des souris sylvestres. Pour le suisse (tamia) l'abondance diminue tant pour un traitement mécanique que chimique.</p> <p>Moins de captures dans les zones traitées pendant les 3 premières années possiblement dû à la diminution de nourriture et d'habitat.</p>	<p>Clough, 1987 dans Lautenschlager, 1993 (Maine, É.-U.)</p> <p>Runciman et Sullivan, 1996 (Colombie-Britannique, Canada)</p> <p>Sullivan et Boateng, 1996 (Colombie-Britannique, Canada)</p> <p>Cole et al., 1998 (Oregon, É.-U.)</p> <p>Lautenschlager, 1995 (Ontario, Canada)</p> <p>Santillo et al. 1989 dans Lautenschlager, 1993 (Maine, É.-U.)</p>
Effet à court et moyen terme	<p>Composition des espèces pas affectée les 3 années suivant le traitement.</p> <p>Populations de certaines espèces sont affectées durant les 2 premières années, mais 3 à 4 ans après les populations reviennent à l'équilibre.</p> <p>Augmentation de la souris sylvestre 2-3 ans après le traitement et diminution du campagnol à dos roux de Gapper les 3 premières années après l'application.</p> <p>Diversité des communautés de plantes et de petits mammifères a été conservée à l'échelle du paysage suite au traitement. La dynamique des populations de mammifères a aussi été conservée.</p> <p>Reproduction, survie et croissance de la souris sylvestre et du campagnol d'Oregon n'ont pas changé suite au traitement. La richesse de ces espèces n'a pas changé alors que la diversité a varié un peu.</p> <p>Richesse et densité globale semblable pour une forêt mature, une régénération naturelle et une plantation de conifères traitée ou non.</p>	<p>Gagné et al., 1999 (Québec, Canada)</p> <p>Lautenschlager et al., 1997b, 1998</p> <p>McMillan et al., 1990 (Ontario, Canada)</p> <p>Sullivan et al., 1998a et b (Colombie-Britannique)</p> <p>Sullivan et al., 1997 (Colombie-Britannique)</p> <p>Milton et Towers, 1990 dans Lautenschlager, 1993 (Nouvelle-Écosse, Canada)</p>

Tableau 2c. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier (d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Thème de l'étude		Observations et conclusions	Références
Gros mammifères		L'utilisation du territoire tend à être réduite les 3 années suivant le traitement au glyphosate et revient à la normale à moyen terme.	
Effets à court terme		Cerf à queue noir : aucune aversion à consommer de la végétation traitée au glyphosate.	Sullivan et Sullivan, 1979 (Colombie-Britannique)
		Cerf à queue noir : aucune aversion à brouter la végétation traitée sauf pour des concentrations phytotoxiques de 2,4 et 4,5 kg/ha.	Campbell et al. 1981 (Oregon, É.-U.)
Effets à court et moyen terme		Cerf à queue noir : un an suivant le traitement, aucune réduction de l'utilisation du secteur traité est observée.	Sullivan, 1985 (Colombie-Britannique)
		Original : broutage hivernal diminue dans les secteurs traités (diminution de la végétation à cause du glyphosate), mais déplacement normal est quand même observé dans ces zones.	Kelly, 1993 (Ontario, Canada)
		Original : diminution du brouillage disponible de 5 à 41% pour un épandage aérien de 1.07 kg/ha et de 63 à 92% pour une quantité de 2.7 kg/ha.	Cumming, 1989 (Ontario, Canada)
		Original : aucune différence significative sur l'utilisation hivernale de territoires traités 7 et 19 mois après, mais après 31 et 43 mois, préférence pour secteur non traité.	Connor et McMillan, 1990 (Ontario, Canada)
		Original : préférence des zones non traitées durant les 3 années qui suivent le traitement.	Lloyd, 1989, 1990 dans Lautenschlager, 1993 (Colombie-Britannique)
		Original : application aérienne modifie l'utilisation du territoire, cette tendance est observable même après trois ans.	Connor, 1992 (Ontario, Canada)
Effet à moyen terme		Original : utilisation du territoire diminue la première et la troisième année suivant le traitement.	Hjeljord et Gronvold, 1988 dans Lautenschlager, 1993 (Norvège)
		Original : réduction de la disponibilité du brouillage pour plus de trois ans.	Lautenschlager, 1991 (Maine, É.-U.)
		Cerf de Virginie : l'utilisation du secteur traité demeure inchangée ou elle augmente l'année suivant le traitement.	
		Original : utilisation du territoire plus élevée que le contrôle de 7-11 ans après alors qu'elle était moindre les 2 premières années.	Eschholz et al., 1996 (Maine, É.-U.)
		Lièvre : utilisation du territoire diminue la première année, mais revient à la normale pour les autres années.	Hjeljord, 1994 (Norvège)
		Original : utilisation du territoire traitée moins importante pour 8 des 9 ans de l'étude.	
		Original : biomasse disponible est réduite significativement pour les 2 ans suivant le traitement. 7-11 ans après la biomasse disponible augmente de 4-5 fois.	Raymond et al., 1996 (Maine, É.-U.)
		Chevrenil : 4 -5 ans après le traitement les chevrenils ne distinguaient plus l'aire traitée du contrôle.	Trichet et al., 1987 (France)
		Chevrenil : 7 -10 après le traitement, les données suggèrent que la disponibilité du brouillage est peu affectée par un traitement.	Vreeland et al., 1998 (Maine, É.-U.)

Tableau 2d. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier (d’après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Gros mammifères Effet à moyen terme	<p>Original : Après 7-10 ans, les secteurs traités tendent à être plus utilisé que le contrôle.</p> <p>Original : Après huit ans, on retrouve plus de brout dans l'aire traitée par rapport au contrôle.</p> <p>La quantité potentielle de protéines digestibles est plus élevée sur le site traité 8 ans après.</p>	<p>Eschholz et al., 1992 dans Lautenschlager, 1993 (Maine, E.-U.)</p> <p>Lautenschlager, 1992 (Ontario, Canada)</p> <p>Cummings et al., 1995 (Ontario, Canada)</p>
Invertébrés	La densité et diversité de certaines espèces peuvent être modifiées par un traitement au glyphosate en milieu forestier.	
Effets à court terme	<p>2 ans après traitement plus grande diversité dans l'aire traitée au glyphosate. Densité de la population de carabid pas affectée par le traitement.</p> <p>Abondance des anthropodes pas affecté de manière significative par le traitement, mais une variation entre anthropodes terrestres et foliaire est observée dans le temps.</p> <p>2 et 3 ans après le traitement, l'activité de surface des gastropodes reviens plus facilement à la normale dans les aires de coupe que dans les aires d'épandage.</p> <p>De toutes les espèces récoltées, l'homoptera est le seul qui présente une densité plus faible dans le secteur traité.</p> <p>Densité des gastropodes est plus élevée dans une plantation d'épinette de 9 ans traitée que dans une forêt mixte de 70 ans et la diversité légèrement plus élevée.</p>	<p>Duchesne et al., 1999 (Ontario, Canada)</p> <p>Gagné et al., 1999 (Québec, Canada)</p> <p>Prezio et al., 1999 (Ontario, Canada)</p> <p>Ward et al., 1998 (Ontario, Canada)</p> <p>Hawkins et al., 1997 (Ontario, Canada)</p>
Amphibien et reptile Effet à court terme	<p>Pour les deux années suivant le traitement, pas de changement dans les populations des deux espèces de grenouille les plus retrouvées dans cet écosystème.</p> <p>Certains développement anormaux sont survenus chez la grenouille des bois (<i>Rana sylvatica</i>) dans une des quatre zones traitées au glyphosate (dans les deux ans suivant l'épandage). Ces anomalies existent cependant naturellement à une fréquence très faible</p>	<p>Bogart, et al., 1995 (Ontario, Canada)</p> <p>Lautenschlager et al., 1998 (Ontario, Canada)</p>

Les alternatives aux herbicides et leurs impacts sur l'environnement

Il existe plusieurs alternatives à l'utilisation d'herbicides pour gérer la végétation accompagnatrice en milieu forestier. Cependant, ces alternatives demeurent moins populaires en raison de leur ratio coût/efficacité relativement élevé par rapport aux herbicides. En effet, malgré que l'aspect économique soit un obstacle de taille à la mise en marché des alternatives, les considérations environnementales réelles ou perçues poussent souvent les gens à développer et utiliser ces techniques pour dégager les plantations (Richardson et al., 2002). Hormis le fait qu'il y ait un intérêt grandissant pour les alternatives, nous pouvons constater qu'il existe peu d'études documentant les impacts environnementaux indirects associés à leurs usages. Dans cette section les différentes alternatives à l'utilisation des herbicides seront brièvement décrites. Le tableau 3 offre un résumé des principales caractéristiques de ces diverses méthodes présentement disponibles.

Traitements mécaniques

La méthode la plus couramment employée pour remplacer les herbicides est le dégagement mécanique (manuel ou motorisé) des plantations et la préparation mécanique du site de reboisement. Ces opérations mécaniques sont d'une efficacité très variable selon le type d'écosystème et leur succès dépend très fortement du type de végétation qui est visé (Balandier et al., 2005). Des études réalisées au Québec depuis plus de 15 ans démontrent que des gains de croissances significatifs chez l'épinette noire sont obtenus 5 ans et 10 ans suivant un traitement mécanique manuel singulier ou répété (Jobidon et Charette, 1997; Jobidon et al., 1999). À l'inverse, on constate que dans les plantations de peupliers hybrides du sud du Québec, les opérations mécaniques motorisées sont inefficaces pour maîtriser la végétation accompagnatrice (Coll et al., 2005). Il s'avère donc nécessaire de bien différencier entre les diverses méthodes mécaniques de gestion de la végétation compétitrice.

En effet, le traitement mécanisé manuel reste très efficace pour la maîtrise de la végétation accompagnatrice lorsqu'il s'agit d'une compétition pour la lumière (Thiffault et al., 2003) en plus de présenter des impacts environnementaux relativement faibles. Cette option demeure donc totalement justifiée dans les aires de reboisement destinées à la croissance d'essences résineuses. Or, dans le contexte d'une gestion forestière plus intensive, comme les plantations d'essences à forte croissance, c'est un dégagement réalisé à l'aide d'un tracteur forestier qui est souvent utilisé bien qu'il ne présente pas une efficacité comparable aux opérations mécaniques manuelles. De plus, les traitements motorisés causent des impacts environnementaux plus prononcés en perturbant le sol. On peut attribuer le manque d'efficacité au fait que le tracteur laisse une aire de végétation non traitée en périphérie du plant ce qui rehausse la compétition. Face à une végétation composée majoritairement de graminées, des espèces fort

compétitives au niveau des ressources du sol, cet espace non traité est suffisant pour gêner la croissance de l'arbre (Thomas et al., 2000 ; Coll et al., 2005). Enfin, certaines de ces espèces de graminées peuvent repousser vigoureusement suite au dégagement motorisé, ce qui fait en sorte que la compétition peut se retrouver accentuée. En résumé, pour que les traitements mécaniques soient efficaces, il faut choisir le bon traitement et posséder une bonne connaissance de l'évolution des complexes végétaux au fil des années afin d'intervenir au bon moment (Bedford et Mackinnon, 1996).

Actuellement, les méthodes mécaniques sont perçues comme ayant des impacts environnementaux plus faibles que les herbicides (Dubois, 2002), bien que très peu d'études rigoureuses ont été faits sur les impacts environnementaux directs et indirects de telles pratiques (Micheal et Hermy, 2002). Ainsi, on ne connaît pas les quantités de monoxyde de carbone qui sont émises par la machinerie utilisée, les quantités d'huile et de diesel qui peuvent se retrouver dans le sol, l'impact de la compaction du sol (dû à la circulation de la machinerie) sur la productivité à long terme de l'écosystème (Kabzems, 1996), l'impact du bruit sur la faune (Radle, 2005) et les effets à long-terme sur la dynamique de la végétation des sous-bois. À l'inverse des études sur les herbicides, les effets des interventions mécaniques sur les modifications de la flore et de la faune (changements dans les habitats, les sources alimentaires, etc.) sont très peu documentés.

Enfin, vu la complexité des interactions qui régit la dynamique des écosystèmes forestiers, il est difficile d'évaluer, surtout à long terme, les impacts environnementaux à l'échelle du paysage à l'aide des différents outils disponibles (Micheal et Hermy, 2002). Par exemple, plusieurs chercheurs ont montré l'inadéquation des indices de diversité traditionnels pour comparer l'impact des traitements chimiques et mécaniques (Micheal et Hermy, 2002). L'efficacité d'un traitement et ces impacts sur l'environnement doivent donc être quantifiés à plusieurs moments au cours du cycle de croissance du peuplement forestier et cela à différentes échelles spatiales afin d'obtenir une vue d'ensemble complète des différents traitements utilisés (Comeau et al, 1996).

Plantes de couverture

L'introduction de plantes couvre-sol, comme des céréales ou des légumineuses, est une technique utilisée depuis bien longtemps aussi bien en Nouvelle-Zélande qu'en Europe (Frochot et al, 2002; Schütz 2004; Provendier et Balandier 2004). Dans le contexte de la maîtrise de la végétation compétitrice, l'utilisation des plantes de couverture vise à restreindre le développement des plantes à fort pouvoir concurrentiel par l'établissement d'espèces mieux tolérées par les semis comme les céréales. Une telle stratégie de gestion de la végétation compétitrice permet d'augmenter la disponibilité du brouet pour les mammifères en plus d'accélérer le renouvellement de la matière organique et

d'enrichir le site en nutriments (Thomas et Steen, 1996). Cependant, sur les sites à productivité élevée, certains types d'herbes peuvent entrer en compétition avec les arbres plantés (Negrave et Kabzems, 1996). Le choix des bonnes plantes couvre-sol ainsi que la technique d'installation de ces plantes dans le milieu s'avèrent donc critiques pour que cette pratique soit réellement efficace. Les effets secondaires de ces pratiques, en terme de modification floristique à moyen et long terme doivent aussi être considérés afin d'optimiser les effets positifs des plantes de couverture tout au long de la rotation.

Animaux domestiques

Une autre alternative d'intérêt est l'abrouissement contrôlé par des animaux domestiques comme le mouton. Des recherches antérieures démontrent que cette stratégie peut être dans certains cas aussi efficace que les herbicides et les traitements mécaniques (Newsome, 1996). Il y a peu d'impacts environnementaux reliés à cette pratique, en plus des bénéfices économiques associés à l'élevage des moutons. Mais, puisque les moutons sont efficaces pour brouter seulement certaines espèces végétales, cette alternative ne peut pas être considérée viable pour tous les types d'écosystèmes forestiers (Newsome, 1996). Il faut par ailleurs bien définir l'état de charge toléré par les plantations du fait des dégâts (brout, frottis) que peuvent occasionner les animaux s'ils n'ont pas une quantité de nourriture suffisante.

Paillis

L'utilisation de paillis couvre sol, de son côté, possède l'avantage d'être efficace pour contrôler toutes les communautés de plantes (McDonald et Fiddler, 1996). En plus de maîtriser la végétation accompagnatrice pendant assez longtemps, le paillis permet aussi de conserver l'humidité à la base des plants (McDonald et Fiddler, 1996). Cependant, certains matériaux comme les copeaux de bois, ont un effet nuisible sur les plants qui ils peuvent causer une diminution de température et du contenu en oxygène dans le milieu (Greenly et Rakow, 1995). Cette stratégie est malgré tout très prometteuse à cause de sa très haute efficacité et de ces faibles impacts sur l'environnement, mais son coût relativement élevé par rapport aux autres alternatives restreint son utilisation (Fiddler et McDonald, 1996; Green et al. 2003). Par ailleurs, des impacts environnementaux négatifs pourraient être associés à l'utilisation de paillis non biodégradables, comme ceux en plastique, car ces derniers peuvent séjourner de nombreuses années dans le sol avant d'être récupérés.

Composés naturels

Certaines autres alternatives s'appuient sur le même principe que les herbicides, soit l'utilisation d'une substance phytotoxique. Des composés naturels comme l'huile essentielle de citronnelle ont déjà été étudiés pour remplacer les herbicides synthétiques. Cependant lorsque l'on compare la quantité de citronnelle (500

kg/ha) nécessaire pour contrôler la végétation versus celle de glyphosate (environ 1 kg/ha), il est légitime de se demander si cette substance naturelle est sécuritaire pour l'environnement (Micheal et Hermy, 2002). Il faut aussi prendre en compte les impacts environnementaux qu'occasionnera la culture de la plante dont on veut extraire le composé naturel pour avoir un bilan global des impacts (Micheal et Hermy, 2002). Les composés naturels demeurent toutefois une alternatives très prometteuse à cause de l'immense diversité qui existe en matière de phytotoxines (Duke et al., 2000).

Champignons

Mis à part les composés naturels, certains organismes pathogènes présentent d'intéressantes qualités comme substance herbicide. C'est notamment le cas du champignon *Chondrostereum purpureum*. Homologué en 2002 par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA), la pâte Myco-Tech^{MD} (nom donné au produit commercial) a été développée, en partie, au Québec par la corporation Myco-Forestis. Cette nouvelle technologie semble prometteuse comme moyen pour contrôler la végétation de feuillus, car aucun impact environnemental négatif n'a été associé à son utilisation (Vanderbroucke et al., 2005). Néanmoins, on peut se questionner sur la mobilité du champignon et du risque qu'il devienne un parasite à contrôler. En principe, son application ne présente aucun risque pour la santé humaine et plusieurs avantages directs et indirects sont associés à son usage (Vanderbroucke et al., 2005). Ce produit a été homologué par l'ARLA, un organisme fédéral canadien, mais non pas par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) qui exige de continuer les tests pendant encore au moins 7 ans.

Bénéfices et inconvénients potentiels des traitements chimiques vs. les méthodes alternatives

Comme nous l'avons vu précédemment, les deux stratégies de gestion de la végétation accompagnatrice les plus utilisées sont les traitements chimiques et mécaniques. Les traitements chimiques sont d'abord choisis à cause de leur excellent ratio coût/efficacité. En effet, selon les recherches que nous avons faites, aucune étude réalisée sur les alternatives n'est parvenue à démontrer qu'il est possible d'obtenir une efficacité comparable aux traitements chimiques à un coût aussi peu élevé. D'un point de vue environnemental, l'utilisation d'herbicides semble poser quelques problèmes puisqu'ils modifient la structure et composition de la végétation pendant quelques années, ce qui a des répercussions sur la faune. Toutefois, les méthodes alternatives modifient également le milieu végétal pendant quelques années. L'obstacle majeur de l'utilisation des herbicides en milieu forestier demeure donc la perception très négative du public à son égard.

Tableau 3. Tableau comparatif des alternatives et des traitements chimiques au niveau de l'efficacité, du coût, des bénéfices et des inconvénients (d'après Thorpe, 1996; Balandier et al. 2005 ; Kabzems, 1996; Schütz 2004; Provendier et Balandier 2004; Newsome, 1996; Fiddler et McDonald, 1996; Green et al. 2003; Vandenbroucke et al, 2005).

Type de traitement	Efficacité	coût	Bénéfices	inconvénients
Chimique				
Aérien	Excellente	Peu coûteux	- Forts gain de croissance - À moyen terme augmentation du brout disponible pour les mammifères	- Potentiel de dérive lors de la pulvérisation aérienne - Besoin d'une bande de protection le long des cours d'eau
Terrestre motorisé	Excellente	Peu coûteux	- Utilisable dans la majorité des écosystèmes forestiers	- Peu accepté socialement - Effets indirects sur la faune à court terme
Terrestre manuel	Excellente	Peu coûteux		
Mécanique				
motorisé	Variable	Peu coûteux	- Reconnu pour avoir de faibles impacts sur l'environnement - Accepté socialement	- Omiérage et compaction du sol dans certains cas (motorisé) - Production de GES
Mécanique manuel	Très bonne	Moyen	- Utilisable dans la majorité des écosystèmes forestiers (manuel seulement)	- Incidents de travail plus fréquents que traitement chimique - Impact du bruit sur la faune - Effets indirects peu documentés
Plantes couvre-sol	Très variable	Peu coûteux	- Réduit le nombre des interventions - Augmente la disponibilité du brout pour les mammifères - Accélère la dégradation de la matière organique - Enrichit le site en nutriments - Acceptable socialement	- Certaines plantes peuvent entrer en compétition avec les plants - Demande une bonne connaissance du milieu (choix d'espèces, période de semence...) - Demande à être bien calibré
Animaux domestiques	Très variable	Peu coûteux	- Peu d'impacts environnementaux - Aspect économique de l'élevage du mouton ou de la chèvre - Acceptable socialement	- Animaux domestiques ne sont pas adaptés à tous les écosystèmes forestiers - Demande à être bien cadré
Paillis	Excellente	Très coûteux	- Peu d'impacts environnementaux - Contrôle de la végétation pour une durée déterminée par l'homme - Conserve l'humidité à la base des plants - Acceptable socialement	- Besoin de retirer les paillis non biodégradables - Risque de multiplication de petits rongeurs nuisibles pour les plants
Mycos-herbicide	Très bonne	Moyen	- Peu d'impacts environnementaux ?? cf ma remarque dans le texte - Aucune bande de protection requise le long des cours d'eau - Aucun risque connu pour la santé humaine - Conserve les habitats fauniques - Conserve une température stable au sol	- Seulement utilisable pour contrôler la végétation feuillue - Acceptabilité sociale reste à démontrer - Peu de connaissance sur la mobilité du champignon en milieu naturel

De leur côté, les traitements mécaniques sont généralement plus dispendieux que les traitements chimiques et leur efficacité est incertaine et variable selon le type de traitement utilisé, les écosystèmes et le type de végétation en présence (Richardson et al., 2002; Thorpe, 1996; d'Anjou, 1996). Au Québec, dans les plantations résineuses, les traitements mécaniques manuels, à l'aide d'une débroussaileuse, sont fort efficaces car ils parviennent à éliminer la végétation compétitrice à proximité des plants en plus de diminuer la compétition pour la lumière provoquée essentiellement par les espèces ligneuses présentes (Thiffault et al., 2003). Cependant, l'efficacité des traitements mécaniques motorisés (avec des tracteurs forestiers) dans les plantations d'essences à forte croissance est discutable (Thomas et al., 2000). En effet, pour éviter d'endommager les plants, une surface importante autour du plant demeure souvent non traitée suite aux opérations motorisées et la végétation restante diminue significativement la croissance des plants. Cette observation a d'ailleurs été confirmée en sol québécois par une étude récente réalisée dans une plantation de peuplier hybride dans le sud du Québec (Coll et al., 2005). Au niveau environnemental, les traitements mécaniques sont perçus comme ayant peu d'impacts, bien que très peu d'études aient abordé le sujet. Une évaluation rigoureuse de l'ensemble des impacts environnementaux reste donc à faire avant de pouvoir affirmer que les traitements mécaniques ont moins d'impacts que les herbicides présentant une faible toxicité. Par ailleurs, la plupart des études comparant les impacts indirects sur la faune des traitements chimiques et mécaniques ne parviennent pas à discriminer lequel de ces traitements perturbe le plus l'écosystème en présence (Hawkins et al., 1997; Lautenschlager et al. 1997; Woodcock et al., 1997).

Ainsi, l'effet du glyphosate vis à vis de l'environnement pourrait s'avérer comparable à celle du traitement mécanique manuel ou motorisé. Par ailleurs, une application très localisée de l'herbicide à la base du plant pourrait diminuer fortement son impact négatif sans en affecter son efficacité (Coll et al. 2005; Richardson et al. 2005).

Conclusion

La problématique de l'utilisation des herbicides chimiques ou synthétiques en foresterie est complexe, comme toute problématique environnementale. Elle fait bien ressortir la dynamique entre l'évolution de la technologie, des connaissances et des perceptions du public. La décision d'interdire l'utilisation des herbicides les plus toxiques en milieu forestier nous apparaît donc comme une sage décision. Cependant, l'interdiction de toute forme d'herbicides en foresterie n'apparaît pas se justifier complètement d'un point de vue environnemental. Il semble donc que de telles interdictions sont d'ordre surtout politique, ayant leurs origines dans la perception qu'ont les gens des dangers des herbicides pour l'environnement. Cette perception plutôt négative des herbicides nous semble provenir de l'utilisation passée des herbicides organochlorés qui sont bien connus pour leurs effets toxicologiques assez prononcés. Malgré des effets

toxicologiques beaucoup moins marqués pour d'autres herbicides, la perception du public reste tout aussi négative. Sans avoir fait d'étude exhaustive, nous avons pu constater auprès de la population que cette différence de toxicité entre les anciens et les nouveaux produits herbicides n'était pas largement connue.

Par ailleurs, il nous semble clair qu'il n'y a pas eu suffisamment d'études réalisées pour évaluer les impacts environnementaux des autres méthodes de contrôles de la végétation compétitrice. Malgré une perception beaucoup moins négative de ceux-ci par le public, il n'est pas certain que le contrôle mécanique manuel, avec ces effets sur la structure et la composition de la végétation, et ceux motorisés avec les effets supplémentaires possibles sur la structure du sol, la compaction du sol, le bruit et la production de GES constitue une alternative moins dommageable qu'une utilisation rationnelle d'un herbicide à faible toxicité. De plus, si on regarde les gains possibles en termes de croissance d'une utilisation d'herbicides dans le cadre d'un zonage fonctionnel où tout gain de croissance des plantations à croissance rapide pourrait-être converti en aire protégée supplémentaire ou en aménagement plus écosystémique sur la portion aménagée de façon extensive, il se peut qu'une utilisation rationnelle d'herbicides à faible toxicité, (p.e. applications locales de courte durée) se justifie d'un point de vue environnemental. Au Québec, les herbicides pourraient ainsi être utilisés en ligniculture sur une faible portion du territoire dans des plantations de peupliers hybrides pour favoriser l'établissement et la croissance des semis durant les deux premières années. Dans le cas des plantations d'espèces indigènes en milieu forestier, où la compétition est surtout pour la lumière, les méthodes mécaniques manuelles semblent les plus appropriées. Cette approche globale concernant l'utilisation des herbicides chimiques a d'ailleurs été retenue par le Forest Steward Council dans le cadre de son système de certification environnemental de l'aménagement forestier. Une grande prudence devra toutefois accompagner l'utilisation des herbicides afin qu'ils soient appliqués adéquatement et que leurs impacts sur les écosystèmes soient surveillés étroitement.

Malgré qu'il existe de nombreuses techniques de gestion de végétation accompagnatrice, c'est généralement le dégagement mécanique et chimique des plantations qui est préconisé à cause du bon rapport coût/efficacité offert. Il existe cependant une multitude d'alternatives qui peuvent être utilisées malgré les coûts financiers plus élevés. Leur utilisation sur de vastes territoires pourrait permettre la réalisation d'une économie d'échelle qui les rendrait plus attrayants aux yeux des gros utilisateurs. Un autre obstacle concernant l'utilisation des alternatives repose dans le manque de connaissances concernant la maîtrise de ces techniques. Enfin, l'implantation de ces stratégies alternatives à plus grandes échelles sera réalisable une fois que les gestionnaires reconnaîtront la plus-value de ces dernières au niveau environnemental.

La gestion de la végétation accompagnatrice par l'utilisation de méthodes mécaniques ou chimiques est donc une façon efficace

d'optimiser la production ligneuse dans les aires de reboisement, mais d'autres outils sont aussi disponibles comme l'amélioration génétique des plants par croisement, la fertilisation du sol, la gestion du couvert forestier, les plantations mixtes, etc. L'intégration de tous ces outils de gestion dans une perspective d'aménagement à l'échelle du paysage devrait donc faire partie d'une stratégie de foresterie durable.

Finalement, pour assurer la pérennité de la ressource, la gestion des écosystèmes forestiers devra nécessairement passer par une concertation adéquate des acteurs industriels, gouvernementaux, scientifiques et populaires (travailleurs, citoyens, groupes de pressions et autochtones). Cependant, avant d'entreprendre de telles consultations, une vaste campagne d'information adaptée aux réalités des divers acteurs serait nécessaire afin d'harmoniser l'opinion de ces acteurs autour des principaux enjeux de la foresterie. Une communication accrue entre tous les acteurs et une gestion transparente de la ressource forestière apparaissent ainsi comme deux valeurs fondamentales à une gestion forestière durable et respectueuse de l'environnement.

Bibliographie

ARLA, agence canadienne de la lutte antiparasitaire (2006) Recherche d'étiquette dans l'ÉÉRÉ, <http://eddenet.pmra-arla.gc.ca/francais/4.0/4.01.asp> [consulté le 11 février 2006]

Balandier, P., Collet, C., Miller, J.H., Reynolds, P.E., Zedaker, S.M. (2005) Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighboring vegetation. Forestry, sous presse.

Becker, E., Shamoun, S.F. et Hintz, W.E. (2005) Efficacy and environmental fate of *Chondrostereum purpureum* used as a biological control for red alder (*Alnus rubra*). Biological Control, vol. 33, no. 3, 9 pp.

Bedford, L. et Mackinnon, A. (1996) Mechanical Site Preparation for Vegetation Management in Northeastern British Columbia, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 8 pp.

Bogart, J.P., Lautenschlager, R.A. and Bell, F.W. (1995) Effects of alternative vegetation management treatments on amphibians and reptiles in the Fallingsnow ecosystem. dans K Wood, and C. Hollstedt (comps.). The Fallingsnow Ecosystem Workshop. pp. 32–33. Ont. Min. of Nat. Res., Northwest Sci. Tech., Thunder Bay, ON. workshop. pp. 65–87. Nat. Res. Can., Can. For. Serv., For. PestManage. Institute, Sault Ste. Marie, ON.

BAPE, Bureau d'Audience Publique sur l'Environnement (1983-1984) Rapport d'enquête et d'audience publique, Pulvérisation aérienne de phytocides en milieu forestier, 59 pp.

BAPE, Bureau d'Audience Publique sur l'Environnement (1997) Rapport d'enquête et d'audience publique, Programme de dégagement de la régénération forestière, 102 pp.

Campbell, D.L., Evans, J., Lindsey, G.D. et Dusenberry, W.E. (1981) Acceptance by

Blacktailed Deer of Foliage Treated with Herbicides, USDA Forest Service, Portland, Ore., Pacific Northwest Experiment Station, Research Paper PNW-290, 31 p.

Coll, L., Messier, C., Delangrange, S. et Berninger, F. (2005) Belowground competition between hybrid poplar and the herbaceous vegetation in plantation established on previously logged forest sites in southern Quebec, en soumission.

Cole, E.C., McComb, W.C., Newton, M., Leeming L.P. et Chambers, C.L. (1998) Response of small mammals to clearcutting, burning, and glyphosate application in the Oregon coast range, Journal of Wildlife Management, vol 62, no.4, p. 1207–1216.

Comeau et al. (1996) Preface, Integrated Forest Vegetation Management : Options and Applications, FRDA report 251, 4 pp.

Connor, J.F. et Mcmillan, L.M. (1990) Winter Utilization by Moose of Glyphosate-Treated Cutovers, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research, Ltd., p. 5.

Connor, J.F., (1992) Impacts of the Herbicide Glyphosate on Moose Browse and Moose Use of Four Paired Treated-Control Cutovers Near Thunder Bay, Ontario, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research, Ltd., p. 5.

Couture, G., Legris, J., Langevin, L. et Laberge, L. (1995) Évaluation des impacts du glyphosate utilisé dans le milieu forestier, Ministère des Ressources naturelles, Direction de l'environnement forestier, Service du suivi environnemental, 199 pp.

Cumming, H.G., Kelly, C.P., Lautenschlager, R.A. et Thapa, S. (1995) Effects of conifer release with Vision® (glyphosate) on moose forage quality, Alces, vol. 31, p. 221–232.

Cumming, H.C. (1989) First Year Effects on Moose Browse from Two Silvicultural Applications of Glyphosate in Ontario, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 6.

D'Anieri, P., Leslie, M.D. et McCormack M.L., Jr. (1987) Small Mammals in Glyphosate-Treated Clearcuts in Northern Maine U.S.A. dans Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 7.

D'Anjou, B. (1996) Chemical and Manuel Treatments – Coastal B.C., Integrated Forest Vegetation Management : Options and Applications, FRDA report 251, 1 pp.

Déry, S., Gagné, N. et Mélançon, É. (1994) Effets de différents modes de régénération de la sapinière à bouleau blanc sur la faune, terrestre et aviaire : Rapport synthèse 1991-1993, Québec, Université Laval, Département des sciences forestières et de biologie pour le ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de l'environnement forestier, 71 pp.

Doliner, L.H. (1991) Emploi avant récolte du glyphosate (Roundup^{MD}) : Document de travail, Agriculture Canada, Direction des pesticides, 107 pp.

Dubois, P. (2002) Les vrais maîtres de la forêt québécoise, Écosociété, Montréal, 200 pp.

Duchesne, L.C., Lautenschlager, R.A. et Bell, F.W. (1999) Effects of clear-cutting and plant competition control methods on carabid (*Coleoptera: Carabidae*) assemblages in northwestern Ontario, Environmental Monitoring and Assessment, vol. 56, p 87–96.

Duke S., Romagni J. et Dayan F. (2000) Natural products as sources for mechanisms of herbicidal action, Crop Protection, vol. 19, 7 pp.

Eschholz, W.E., Servello, F.A., Griffith, B., Raymond, K. et Krohn, W.B. (1996) Winter use of glyphosate-treated clearcuts by moose in Maine, Journal of Wildlife Management, vol. 60, no.4, p. 764–769.

Feller, M.C. (1996) Use of Prescribed Fire for Vegetation Management, Integrated Forest Vegetation Management : Options and Applications, FRDA report 251, 19 pp.

Feng, J.C. et Thompson, D.G. (1990) Fate of Glyphosate in a Canadian Forest Watershed. 2. Persistence in Foliage and Soils, Journal of Agricultural Food Chemistry, vol. 38, no. 4, 8 pp.

Fiddler, G. et McDonald, P. (1996) Vegetation Response to Five Methods of Plantation Release in Northern California, Integrated Forest Vegetation Management : Options and Applications, FRDA report 251, 2 pp.

Food and agriculture organisation (FAO) Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (1994) La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 1994, Rome.

Forest Stewardship Council (2005) FSC Principles & Criteria of Forest Stewardship, http://www.fsc.org/en/about/policy_standards/princ_criteria [consulté le 11 février 2006]

Franz, J.E., Mao, M.K. et Sikorski, J.A. (1997) Glyphosate : a unique global herbicide, American Chemical Society Monograph 189. American Chemical Society, Washington DC.

Frochot et al. (2002) La gestion de la végétation accompagnatrice : état et perspective, Revue Forestière Française, vol. 6, 15 pp.

- Frochot, H., Collet, Balandier C. et Wagner, R. (2003) Foreword, *Annals of Forest Sciences*, vol. 60, 1 pp.
- Gagné, N., Bélanger, L. et Huot, J. (1999) Comparative response of small mammals, vegetation, and food sources to natural regeneration and conifer release treatments in boreal balsam fir stands of Quebec, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29, p. 1128–1140.
- Green, D.S., Kruger, E.L., Stanosz, C.R. (2003) Effects of polyethylene mulch in a short rotation, poplar plantation vary with weed control strategies, site quality and clone, *Forest Ecology Management*, vol. 173, 10 pp.
- Greenly, K.M. et Rakow, D.A. (1995) The effect of wood mulch type and depth on weed and tree growth and certain soil parameters, *Journal of Arboriculture*, vol. 21, no. 5, p. 225-232
- Hardy, B. et Desgranges, J.L. (1990) Évaluation des effets à moyen terme sur les communautés aviennes de l'entretien des plantations d'épinettes noires (*Picea mariana*) aux phénoxys (Estoprop) et au glyphosate (Roundup), *Environnement Illimité inc. pour*
- Hartzler, B. (2001) Glyphosate – A Review, Department of Agronomy, Iowa State University, Weed science, 7 pp.
- Hawkins, J.W., Lankester, M.W. et Lautenschlager, R.A. (1997) Effects of alternative conifer release treatments on terrestrial gastropods in northwestern Ontario, *The Forestry Chronicle*, vol. 73, no. 1, 8 pp.
- Hjeljord, O. (1994) Moose (*Alces alces*) and mountain hare (*Lepus timidus*) use of conifer plantations following glyphosate application, *Northern Journal of Agricultural Sciences*, vol. 8, no.3-4, p. 181–188.
- Houston, A.P.C., Visser, S. et Lautenschlager, R.A. (1998) Response of microbial processes and fungal community structure to vegetation management in mixedwood forest soils, *Canadian Journal of Botany*, vol. 76, no. 12, 9 pp.
- Jobidon, R., Trottier, F. et Charette, L. (1999) Dégagement chimique ou manuelle de plantation d'épinette noire ? Étude de cas dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc au Québec, *The Forestry Chronicle*, vol. 76, p. 973-979
- Jobidon, R. et Charette, L. (1997) Effet, après 10 ans, du dégagement manuel simple ou répété et de la période de coupe de la végétation de compétition sur la croissance de l'épinette noire en plantation, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, p. 293-305
- Kabzems, R. (1996) Where Have the Big Pores Gone? Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 2 pp.
- Kelly, C.P. (1993) Effects of Variable Rate Aerial Application of Vision^{MD} on Moose (*Alces alces*) Browse and Conifer Crop Tree Performance, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 10-11.
- Kimmins, J.P. (2004) *Forest Ecology*, 3^e édition, Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, 611 pp.
- Kools, S.A.E., Roovers, M., van Gestel, C.A.M. et van Straalen, N.M. (2005) Glyphosate degradation as a soil health indicator for heavy metal polluted soils, *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 37, no. 7, p. 1303-1307
- Lautenschlager, R.A. et Sullivan, T.P. (2002) Effects of herbicide treatments on biotic components in regenerating northern forests, *The Forestry Chronicle*, vol. 78, 37 pp.
- Lautenschlager, R.A., Bell, F.W., Wagner, R.G. et Reynolds, P.E. (1998) The Fallingsnow Ecosystem Project: Documenting the consequence of conifer release alternatives, *Journal of Forestry*, vol. 96, no. 11, p. 20–27.
- Lautenschlager, R.A., Bell, F.W. et Wagner, R.G. (1997) Alternative conifer release treatments affect small mammals in northwestern Ontario, *The Forestry Chronicle*, vol. 73, no.1, p. 99–106.
- Lautenschlager, R.A. (1995) Competition between forest brush and planted white spruce in north-central Maine, *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 12, no.4, p. 163–167.
- Lautenschlager, R.A. (1993) Effects of Conifer Release with Herbicides on Wildlife (A Review with an Emphasis on Ontario's Forests), Sault Ste-Marie, Ont., Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Forest Research Information Paper No. 111, 23 pp.
- Lautenschlager, R.A., (1992) Effects of Conifer Release with Herbicides on Moose: Browse Production, Habitat Use, and Residues in Meat, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 13.
- Lautenschlager, R.A. (1991) Response of Wildlife in Northern Ecosystems to Conifer Release with Herbicides dans Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate: A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 12-13.
- Lavy, T.L., Cowell, J.E., Steinmetz, J.R. et Massey, J.H. (1992) Conifer seedlings nursery worker exposure to glyphosate, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 22, no. 1, 8 pp.
- Légris, J. (1989) Bilan des contrôles environnementaux suite à des pulvérisations de glyphosate en milieu forestier sur les terres publiques québécoises, Service des études environnementales, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec, 24 pp.
- Linhgren, P. et Sullivan, T. (2001) Influence of alternative vegetation management treatments on conifer plantation attributes: abundance, species, diversity, and structural diversity, *Forest Ecology and management*, vol. 142, 10 pp.
- Luginbuhl, J.-M. et Green, Jr., J.T. (2005) Goats to control the encroachment of undesirable brush and woody species in pasture of the appalachian region, résumés de la 5th International Conference on Forest Vegetation Management, <http://outreach.cof.orst.edu/icfvm/book.pdf> [consulté le 11 février 2006]
- Loi sur les pesticides (2005) Règlement sur les permis et les certificats pour la vente et l'utilisation des pesticides, www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca [consulté le 11 février 2006]
- MacKinnon, D.S. et Freedman, B. (1993) Effects of Silvicultural Use of the Herbicide Glyphosate on Breeding Birds of Regeneration Clearcuts in Nova Scotia, Canada» dans Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 34-35.
- Malik, J., Barry, G. et Kishore, G. (1989) The Herbicide Glyphosate, Biofactors, vol. 2, no. 1, 9 pp.
- McCormack, M. (2000) A Time Line of herbicide use for Forest Vegetation Management in Northeastern, Vegetation Management: New Millenium - New Challenges, a joint conference of the Ontario Vegetation Management Assn, Assn Québécoise de Gestion de la Végétation, and Atlantic Vegetation Management Assn. Québec, Canada. 24-27 Octobre.
- McDonald, P. et Fiddler, G. (1996) Mulching : A Persistent Technique for Weed Suppression, Integrated Forest Vegetation Management : Options and Applications, FRDA report 251, 7 pp.
- McMillan, L.M., Connor, H.R., Timmermann, J.G., Mcnicol et Krishka, C.S. (1990) Small Mammal and Lesser Vegetation Response to Glyphosate Tending in North Central Ontario, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 10.
- Messier, C. et D.D. Kneeshaw (1999) Thinking and acting differently for sustainable management of the boreal forest, *The Forestry Chronicle*, vol. 75, no. 6, 10 pp.
- Micheal, J. L. et Hermy, M. (2002) Ecological Impact of Forest Vegetation Management, 4th International Conference on Forest Vegetation Management (theme synthesis), <http://www.ifvmc.org/ifvmc4-ecological.html> [consulté le 11 février 2006]
- Mihajlovich, M., Pitt, D. et Blake, P. (2004) Comparaison de four glyphosate herbicide formulations for white spruce release treatment, *The Forestry Chronicle*, vol. 80, 5 pp.
- Miller, K.V. et Miller, J.H. (2004) Forestry herbicide influences on biodiversity and wildlife habitat in southern forests, *Wildlife Society Bulletin*, vol. 32, no. 4, 12 pp.
- Milton, G.R. et Towers, J. (1990) Relationships of Songbirds and Small Mammals to Habitat Features on Plantation and Natural Regeneration Sites, Nova Scotia, Canadian Institute of Forestry pour The St. Mary's River Forestry-Wildlife Project Steering Committee, report no.7, 57 pp.
- MRNF, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (2005) Utilisation des phytocides en milieu forestier québécois depuis 1971, histogramme disponible au : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/protection/Phytocides.xls> [consulté le 11 février 2006]
- Monsanto Company (2003) High Production Volume (HPV) Challenge Program, Test plan for Glyphosate Intermediate, cas no.: 5994-61-6, 8 pp.

- Morrison, M.L. et Meslow, E.C. (1984) Effects of the Herbicide Glyphosate on Bird Community Structure in Western Oregon» dans Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 35.
- Mount, P. (1992) Kudzu, goat interactions, résumé de la 1st international conference of forest vegetation management, Auburn University, Alabama.
- Negrave, R. (1996) Sheep Grazing Controls *Calamagrostis canadensis*-dominated Vegetation in the Boreal Forest, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 2 pp.
- Negrave, R. et Kabzems, R. (1996) Use of Replacement Vegetation for Control of Competing Vegetation in Spruce Plantations in the BWBS, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 3 pp.
- Newsome, T. (1996) The Use of Sheep in Forest Vegetation Management, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 8 pp.
- Newton, M. et Balandier, P. (2002) Social and economic considerations in forest vegetation management: summary of papers, 4th International Conference on Forest Vegetation Management (theme synthèse, 2002), <http://www.ifvmc.org/ifvmc4-social.html> [consulté le 11 février 2006]
- NCAP, Northern Coalition for Alternative to Pesticides (1999a) Are pesticides hazardous to our health? Journal of pesticide reform, vol.19, 2 pp.
- NCAP, Northern Coalition for Alternative to Pesticides (1999b) Do Pesticides Contaminate Our Rivers, Streams, and Wells? Journal of pesticide reform, vol.19, 1 pp.
- Peixoto, F. (2005) Comparative effects of the Roundup and glyphosate on mitochondrial oxidative phosphorylation, Chemosphère, vol. 61, no. 8, p. 1115-1122
- Pieniazek, D., Bozena, B. et Duda, W. (2004) Comparison of the effect of Roundup Ultra 360 SL pesticide and its active compound glyphosate on human erythrocytes Pesticide Biochemistry and Physiology, vol. 79, no. 2, p. 58-63
- Prezio, J.R., Lankester, M.W., Lautenschlager, R.A. and Bell, F.W. (1999) Effects of alternative conifer release treatments on terrestrial gastropods of regenerating spruce plantations, Canadian Journal of Forest Research., vol. 29, p. 1141-1148.
- Provendier, D et Balandier, P (2004) Contrôler la végétation en plantation forestière : premiers résultats sur les modifications micro-environnementales engendrées par l'utilisation de plantes de couvertures, Ingénieries no. 40, 12 pp.
- Radle, A (2005) The Effect of Noise On Wildlife : A Literature Review, World Forum For Acoustic Ecology, College of Education, University of Oregon, <http://interact.uoregon.edu/MediaLit/WFAE/readings/radle.html> [consulté le 11 février 2006]
- Raymond, K.S., Servello, F.A., Griffith B. et Eschholz, W.E. (1996) Winter foraging ecology of moose on glyphosate-treated clearcuts in Maine, Journal of Wildlife Management, vol. 60, p. 753-763.
- Relyea, R.A. (2005) The Lethal Impacts of Roundup and Predatory Stress in Six Species of North American Tadpoles, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 48, no. 3, 7 pp.
- Richardson, B. (1993) Vegetation management practices in plantation forests of Australia and New Zealand, Canadian Journal of Forest Research, vol. 23, no. 10, p. 1989-2005
- Richardson, B., Christensen, P. et Thompson, D. (2002) Efficacy of conventional (chemical) methods, new approaches and alternatives to herbicides, Fourth International Conference on Forest Vegetation Management (theme synthèse).
- Richardson, B., Kimberley, M., Gous, S., et Coker, G. (2005) Pinus radiata growth response to spot weed control, résumés de la 5th International Conference on Forest Vegetation Management, <http://outreach.cof.orst.edu/icfvm/book.pdf> [consulté le 11 février 2006]
- Roy, V., Thiffault, N. et Jobidon, R. (2003) Maîtrise intégrée de la végétation au Québec (Canada) : une alternative efficace aux phytocides chimiques, note de recherche forestière no. 123, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, 8 pp.
- Runciman, J.B., et Sullivan, T.P. (1996) Influence of alternative conifer release treatments on habitat structure and small mammal populations in south central British Columbia, Canadian Journal of Forest Research, vol.26, p. 2023-2034.
- Santillo, D.J., Brown, P.W. et Delisle, D.M., Jr. (1989) Response of Songbirds to Glyphosate-Induced Habitat Changes on Clearcuts, Non-Target Impacts of the Herbicide Glyphosate : A Compendium of References and Abstracts, Colombie-Britannique, 3e éd., D.S. Sullivan et T.P. Sullivan, Applied Mammal Research Ltd., p. 35.
- Schütz, J.-P. (2004) Opportunistic methods of controlling vegetation, inspired by natural plant succession dynamics with special reference to natural outmixing tendencies in a gap regeneration, Annals of Forest Sciences, vol. 61, 8 pp.
- Stratton, G.W. et Stewart, K.E. (1992) Glyphosate effects on microbial biomass in a coniferous forest soil, Environmental Toxicology and Water Quality, vol. 7, no. 3, 14 pp.
- Sullivan, T.P. et Sullivan, D.S. (1979) The Effects of Glyphosate Herbicide on Food Preference and Consumption in Black Tailed Deer, Canadian Journal of Zoology, vol. 57, no.1, p. 1407-1412.
- Sullivan, T.P. (1985) Effects of Glyphosate on Selected Species of Wildlife, The Herbicide Glyphosate, Toronto, E. Grossbard et D. Atkinson (eds), Butterworths and Co.(Publishers) Ltd., p. 186-199.
- Sullivan, T.P. et Boateng, J.O. (1996) Comparison of small-mammal community responses to broadcast burning and herbicide application in cutover forest habitats, Canadian Journal of Forest Research, vol 26, p. 462-473. Sullivan, T.P., Sullivan, D.S., Lautenschlager, R.A. et Wagner, R.G. (1997) Long-term influence of glyphosate herbicide on demography and diversity of small mammal communities in coastal coniferous forest, Northwestern Sciences, vol. 71, no.1, p 6-17.
- Sullivan, T.P., Wagner, R.G., Pitt, D.G., Lautenschlager R.A. et Chen, D.G. (1998a) Changes in diversity of plant and small mammal communities after herbicide application in sub-boreal spruce forest. Canadian Journal of Forest Research, vol. 28, p. 168-177.
- Sullivan, T.P., Nowotny, C., Lautenschlager R.A. et Wagner R.G. (1998b) Silvicultural use of herbicide in sub-boreal spruce forest: implications for small mammal population dynamics, Journal of Wildlife Management, vol. 62, p. 1196-1206.
- SERA, Syracuse Environmental Research Associates, (2002) TR 01-43-08-04a, Neurotoxicity, Immunotoxicity, and Endocrine Disruption with Specific Commentary on Glyphosate, Triclopyr and Hexazinone: Final Report, Submitted to the Forest Service
- Tatum, V.L. (2004) Toxicity, transport, and fate of forest herbicides, Wildlife Society Bulletin, vol. 32, no. 4, 7 pp.
- Thiffault, N., Roy, V., Cyr, G., Prigent, G., Jobidon, R., Carrette, L., (2004) Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effet du scarification, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans, The Forestry Chronicle, vol. 80, no. 1, p. 141-149
- Thiffault, N., Roy, V., Prigent, G., Cyr, G., Jobidon, R. et Ménétrier, J. (2003) La sylviculture des plantations résineuses au Québec, Le Naturaliste Canadien, Vol. 127, no. 1, p. 63-80
- Thomas, C. et Steen, O. (1996) Cover Crops for Forest Vegetation Management, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 8 pp.
- Thomas, K.D., Comeau, P.G. et Brown, K.R. (2000) The sylviculture of hybrid poplar plantations, Ministère des Forêts, C.-B., Research Branch, Extended Note 47.
- Thompson D., et Pitt, D. (2003) A review of Canadian forest vegetation management research and practice, Annals of Forest Sciences, vol., 60, 14 pp.
- Thorpe, S. (1996) Chemical and Manual Treatment in the Northern Interior, Integrated Forest Vegetation Management: Options and Applications, FRDA report 251, 5 pp.
- Trichet, P., Boisaubert, B., Frochot H. et Picard, J.F. (1987) Impact of herbicide treatments against bramble *Rubus fruticosus* Lagg on roe deer *Capreolus capreolus* L. Gibier Faune Sauvage, vol. 4, p.165-188.
- US Environmental Protection Agency (1990) Pesticide Fact Handbook, vol. 2, New-Jersey, Noyes Data Corporation, 666 pp.
- Vandenbroucke J.E., Gaucher C. et Major N. (2005) Biological Vegetation Management: an alternative to chemical pesticides, en soumission.

- Vreeland, J.K., Servello F.A. et Griffith, B. (1998) Effects of conifer release with glyphosate on summer forage abundance for deer in Maine, Canadian Journal of Forest Research, vol. 28, p.1574–1578.
- Voet, D. et Voet, J. (1998) Biochimie, De Boeck Université, Paris et Bruxelles, 1361pp
- Wagner, R.G. (1994) Toward integrated forest vegetation management, Journal of Forestry, vol. 92, no. 11, 5 pp.
- Wagner, R.G., Flynn, J. et Gregory, R. (1998) Public perceptions of risk and acceptability of forest vegetation management alternatives in Ontario, The Forestry Chronicle, vol. 77, no. 5, p. 720-727
- Ward, J.L., Prevost, Y.H., Lautenschlager, R.A. et Bell, F.W. (1998) Effects of alternative conifer release treatments on epigeal insects, Coleoptera, Carabidae, and non-insectan arthropods in northwestern Ontario. Third International Conference on Forest Vegetation Management, Popular Summaries, pp. 351–353. Info. Pap. No. 141. Ont. Min. Nat. Res., Ont. For. Res.Inst., Sault Ste. Marie, ON.
- Williams, G.M., Kroes, R., et Munro, I.C. (2000) Safety Evaluation and Risk Assessment of the Herbicide Roundup and Its Active Ingredient, Glyphosate, for Humans. Regulatory Toxicology and Pharmacology, vol. 31, p. 117-165
- Woodcock, J., Lautenschlager, R.A., Bell, F.W. et Ryder, J.P. (1997) Indirect effects of conifer release alternatives on songbird populations in northwestern Ontario, The Forestry Chronicle vol. 73, no. 1, 6pp.